

コンクリートのASRに及ぼすオートクレーブ処理の 影響に関する研究

西林 新蔵・王 鉄成・吉野 公

(1993年9月1日受理)

A Study on the Effect of Autoclave Treatment on ASR in Concrete

by

Shinzo NISHIBAYASHI, Tiecheng WANG and Akira YOSHINO

Department of Civil Engineering

(Received September 1, 1993)

The studies are planned to investigate the effect of various kinds of testing condition, such as, storage conditions, alkali contents, water cement ratio and storage temperatures, on expansion characteristics of concrete containing reactive aggregate.

At the same time, the expansion characteristics of concrete at autoclave curing have been compared with 40°C and outdoors.

There is existent the pessimum alkali content at 3.0% in water cement ratio is the greatest and the effect of water cement ratio is greatest in the autoclave treatment.

Key words : Alkali silica reaction, Reactive aggregate, Expansion, Alkali content, Water cement ratio, Pessimum value, Storage condition

1. まえがき

アルカリ骨材反応の研究においては、実際のコンクリートを対象とした試験によって種々の条件下のコンクリートの膨張特性および劣化の進展を直接的に明らかにすることが重要である。しかし、この種の試験においては結果を得るためには長期間の観察、測定が必要となる。従って、実際に使用しようとするコンクリートが、将来アルカリシリカ反応による劣化が生じないかどうかを迅速に確認するための試験方法と反応性の判定規準を検討しておくことが望まれている。一方、アルカリシリカ反応の促進試験方法の一つとしてオートクレーブ処理が提案されている。オートクレーブ促進試験では、アルカリ濃度、温度、圧力、時間などがアルカリシリカ反応による膨張に大きい影響を及ぼすと考えられるが、それぞれの条件の設定は、実際のコンクリートの実験によらなければならない。

本研究においては、コンクリートの膨張特性を早期に把握し、膨張の進展の予測および膨張特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、鳥取大学で採用しているコンクリートのオートクレーブ促進試験 (TCAM) を行う。この試験では圧力と処理時間の要因を設定し、最適の圧力と処理時間を決め、膨張に及ぼす反応性骨材の混合割合、アルカリ量、水セメント比、温度の影響およびベシマム条件を検討する。さらに、自然の暴露環境あるいは40℃保存条件下のコンクリートの膨張特性と比較、検討するものである。

2. 実験概要

(1) 使用材料

試験に使用したセメントは普通ポルトランドセメント

で、アルカリ含有量がNa₂O当量で、0.5%である。添加アルカリ化合物としては試薬1級のNaOHを練混ぜ水に溶かして使用した。

試験に使用した粗骨材 (最大寸法は20mm) は、非反応性骨材NT (鳥取産、F.M.=6.64) と反応性骨材T2 (鳥取産、F.M.=6.53) である。細骨材は非反応性骨材NSと反応性骨材T2 (砕砂、F.M.=2.61) である。これらの骨材の物理的性質および化学法 (JCI AAR-1) によるアルカリ骨材反応性試験の結果を表-1に示す。

(2) 実験計画

実験計画を表-2に、コンクリートの配合を表-3に示す。アルカリ含有量は1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 の8水準、反応性骨材の混合割合は0, 100 %の2水準とし、単位セメント量は350 kg/m³、水セメント比は0.54, 0.58, 0.62の3水準、処理時間は1, 2, 4, 6, 8, 12 時間、処理圧力は0.2 MPa である。これらの要因中の水準を組合わせた試料を作成した供試体寸法は7.5 × 7.5 × 40cmである。

(3) 実験方法

コンクリートの練混ぜは可傾式ミキサーで行い、コンクリートは打設翌日に脱型し、初期値を測定した後、オートクレーブ処理を行った。その後、恒温室 (20℃, R.H. 80%以上) で24時間保存して膨張量を測定してから、20, 40, 60℃, R.H. 100 %の促進保存を行った。

これらの供試体においては、長さ変化の測定はホイットモアー型ひずみ計を用い、動弾性係数 E.D. (×10⁵ kgf/cm²) はソニック法によるたわみ振動の1次共振振動数から求めた。測定は材令0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3ヶ月、それ以降は1ヶ月ごとに行い、長さ変化、動弾性係数を測定した。

Table -1 Physical and chemical testing results of aggregate (ASTM C 289, JCI AAR-1)

Kinds and symbols of aggregate	Type	F.M	S.G.	W.A. (%)	ASTM, JCI Chemical method (m mol/L)		S _c /R _c
					R _c	S _c	
Non reactive (coarse) NT	Sandstone	6.64	2.70	0.65	21.5	30	1.39
Non reactive (fine) NS	Crushed sand	2.79	2.67	1.40	—	—	—
Reactive (coarse) T2	Pyroxene Andesite	6.53	2.64	1.59	67.5	301	4.46
Reactive (fine) T2	Pyroxene Andesite	2.61	2.64	1.48	67.5	301	4.46

S.G.: specific gravity, W.A.: water absorption

Table -2 Testing plan and conditions

Non reactive aggregates:NT,NS	Alkali contents for cement weight(%) : 0.5
Reactive aggregate: T2	Kind of added alkali: NaOH
Unit weight of cement : 350 (kg/m ³)	Total alkali contents:(Na ₂ O %) 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5)
Slump(cm): 12~15	Reactive aggregate contents (%): 0, 100
Size of specimen(cm): 7.5×7.5 ×40	
Storage condition: 20 ℃, 40 ℃, 60℃ R.H.100 %	
Items of measurement: Length change, Dynamic modulus of elasticity(E.D.), Cracking	

Table -3 Mix proportions of concrete

Mix	Max.size (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C	s/a (%)	Unit weight (kg/m ³)			
						W	C	S	G
1	20	12-15	2	0.54	43	189	350	*292	*397
2	20	12-15	2	0.58	43	203	350	*286	*388
3	20	12-15	2	0.62	43	217	350	*280	*380

* :absolute volume

3. 結果と考察

反応性骨材の混合割合、アルカリ量、水セメント比、温度およびこれらの要因を組合わせた条件のコンクリートについて、オートクレーブ処理による促進試験によって、促進処理直後の膨張特性およびベシムム条件を検討した。

3. 1 膨張に及ぼす処理時間とアルカリ量の影響

図-1 は反応性骨材の混合割合別の膨張量と処理時間との関係を示したもので、図より、処理時間が長くなると膨張量が大きくなり、処理過程に温度、圧力の影響を大きく受け、反応が促進されたものと考えられる。処理時間1, 2, 4 時間では、膨張量は顕著に増大し、処理時間6 時間以上になると、膨張量の増加率はやや小さくなる傾向が見られる。また、反応性細骨材を使用した場合(0/100)、膨張量が大きいことがわかる。0/100, 100/100 の場合、処理時間2 時間で、0.1 %以上の膨張量が現われ、一方、反応性粗骨材を使用した場合(100/0)は、処理時間がいずれであっても、膨張量は0.1 %以下である。

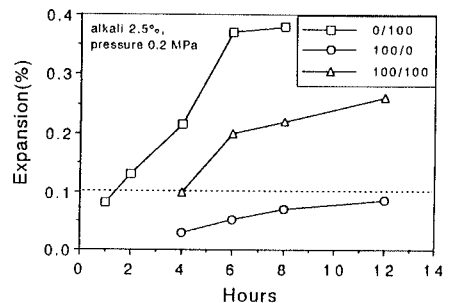


Fig. 1 Relationship between treatment hours and expansion

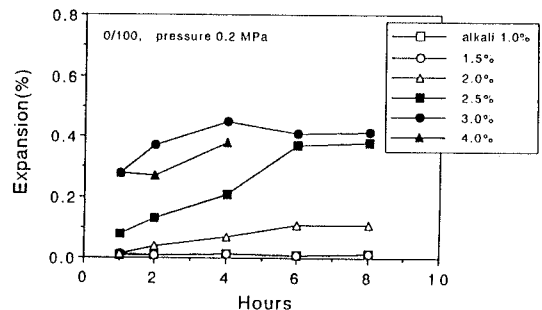


Fig. 2 Relationship between treatment hours and expansion

図-2に各アルカリ量別の膨張量と処理時間との関係を示す。1.0、1.5%の低いアルカリ量では、処理時間8時間まではほとんど膨張が現われないが、アルカリ量2.0%の場合、処理時間が長くなると膨張量は僅かながら増加を示し、ほぼ6時間で膨張は収束する。アルカリ量の多い3.0%以上の場合、処理時間1時間で膨張量が0.3%以上と短時間でかなり大きな値を示す。また、図より、膨張量はある処理時間を越えると増加しない。これは長時間の処理をすることによって供試体中のアルカリが外部に溶出したのが一因と考えられる。

図-3は反応性骨材の混合割合別の膨張量とアルカリ量との関係を示すものである。図より、アルカリ量の増加に伴って膨張量が大きくなる。アルカリ量2.5%以上では、0/100、100/100のコンクリートの膨張量は0.1%以上になるが、細骨材にだけ反応性骨材を使用した場合(0/100)には、アルカリ量が3.0%を超えると膨張量は減少し、ベシマムアルカリ量の存在が認められる。アルカリ量がある値以上になると膨張量が減少するのは、アルカリ量が増加すると $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ の比が小さくなってゲルの粘性が減少し、そのため、水の吸収量が少なくなると膨張量が低下するからであると考えられる^{11, 2)}。

図-4に各処理時間におけるアルカリ量と膨張量との関係を示す。アルカリ量1.5%まではほとんど膨張を示していないが、アルカリ量が1.5~3.0%の間で膨張量は急激に増加し、3.0%以上になると、処理時間1~4時間では、膨張量は平衡もしくは逆に低下する傾向を示し、最大膨張量を示すアルカリ量のベシマム値はほぼ3.0%であると考えられる。アルカリ量がある値を超えると膨張量が低下することは、前述したように生成したゲルの $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 比とそれに伴うゲルの粘性に関係していると考えられる。また、処理時間が6時間以上になるとアルカリ量2.5~3.0%における膨張量の増加割合は穏やかになっているので、処理時間とアルカリ量との組合わせによって最適の試験条件が設定される。本試験においては処理圧力0.2 MPaのオートクレーブ処理を施した場合、アルカリ量3.0%では処理時間4時間が、アルカリ量2.5%以下では処理時間6時間が最適処理時間であると考えられる。

反応性細骨材を使用したコンクリートの場合のオートクレーブ処理直後の膨張量とアルカリ量との関係を図-5に示す。図より、膨張特性は水セメント比によってかなり異なり、水セメント比の減少に伴って膨張量は増大することがわかる。水セメント比が0.54のとき、アルカ

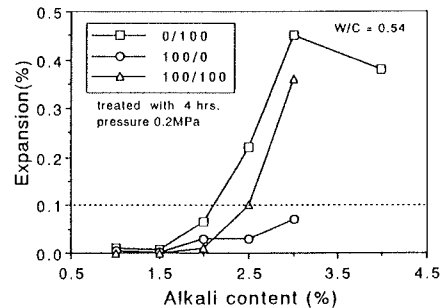


Fig. 3 Relationship between alkali content and expansion

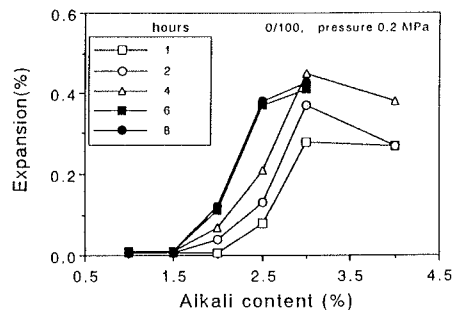


Fig. 4 Relationship between alkali content and expansion

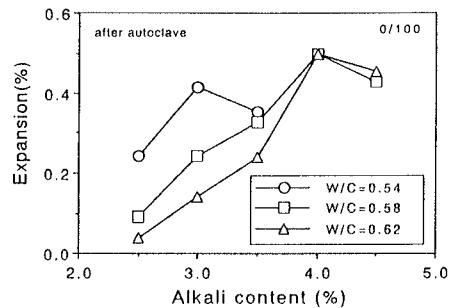


Fig. 5 Relationship between alkali content and expansion

リ量 3.0%で大きい膨張量が現われ、ベシマムアルカリ量の存在が確認された。水セメント比0.58と0.62の場合は、アルカリ量の増加に伴って膨張が大きくなるが、アルカリ量 4.0%のときに、最大膨張が生じた。水セメント比の増加に伴ってベシマムアルカリ量が大きくなる傾向があるが、水セメント比0.58以上になると、ベシマム値に及ぼす水セメント比の影響は小さくなり、アルカリ量のベシマム値がほとんど一定になると考えられ

る。

3. 2 膨張に及ぼす水セメント比の影響

図-6にオートクレープ処理直後の水セメント比と膨張量との関係を示す。図より、水セメント比の増大に伴って膨張量は減少することが認められる。水セメント比が大きいくほど硬化組織中の空隙が多くなり、反応によって生成したゲルがその中に移動し、膨張圧が発揮しにくくなるため膨張量は低下したと考えられる。また、この場合、ベシマム水セメント比は水セメント比0.5以下にあると推察される。

前に述べた結果から、アルカリ量と水セメント比との組合わせた影響を考慮すると、ベシマム値が存在する範囲はアルカリ量と水セメント比の増加に伴って増大し、アルカリ量と水セメント比が小さくなるのに伴って減少する傾向がある。本研究において確認されたベシマム値は、反応性細骨材を使用した場合のアルカリ量と水セメント比との組合わせでは、総アルカリ量 10.5 kg/m^3 と水セメント比0.54、総アルカリ量 14.0 kg/m^3 と水セメント比0.58、0.62である。

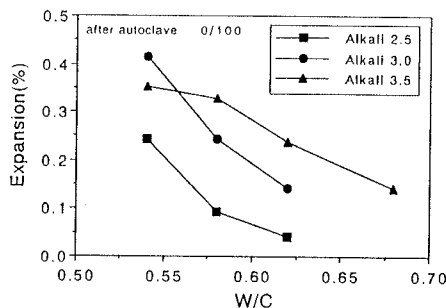


Fig. 6 Effect of water cement ratios

3. 3 膨張に及ぼす温度の影響

保存条件における温度の影響を図-7～図-9に示す。これはオートクレープ処理直後の膨張量を基とした膨張量の変化について示したのものである。これらの図より、アルカリ量と水セメント比が異なるが、いずれも、60℃保存の場合に、より大きい膨張が現われ、40℃保存の場合の膨張量は20℃保存のものより大きいことが認められる。アルカリシリカ反応による膨張の進行は温度に依存し、温度が高くなると膨張が速く進展すること

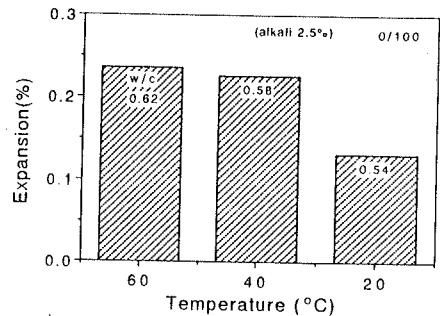


Fig. 7 Relationship between storage temperatures and expansion

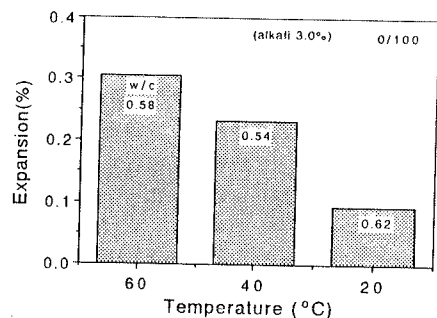


Fig. 8 Relationship between storage temperatures and expansion

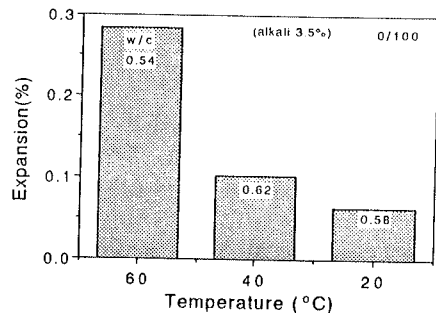


Fig. 9 Relationship between storage temperatures and expansion

が考えられる。またアルカリ量の増加に伴って40℃と60℃保存の膨張量の差が大きくなる傾向が認められる。

これらの結果から、コンクリートの場合の保存温度の影響はモルタルの場合のものやや異なることがわかる。コンクリートの場合には、保存温度が高いほど膨張量が大きくなり、60℃保存の膨張量は40℃、20℃保存のものよりも大きい。しかし、モルタルの場合には、オパールを使用したDiamondの報告と中野らのモルタルの実験結果によると、膨張は初期では60℃の方が大きい

が、20℃保存のものは長期に膨張が急に進展し、40℃保存のとき膨張が最大になる。このような変化について、膨張は温度によって一方的に支配されるものではなく、アルカリと反応性シリカの量の比率と水和の進行状態とに関係があることが考えられる。

3. 4 要因の影響度の評価

ここでは直交配列実験計画法によって、アルカリ量、水セメント比、保存温度を主要因（因子）として、多元配置の3水準の直交表を用い、アルカリシリカ反応に及ぼす要因の影響度について解析し、膨張特性を検討した³⁾。

採用したL9 (3⁴)直交表³⁾と計算結果を表-4に示す。No. は直交表の行数を表わし、実験番号に対応し、全て3元配置実験によって数理解析を行った。供試体は一つの配合に3本を打設し、解析の場合には平均値を用いた。

(1) オートクレーブ処理と促進保存について

表-4中のデータ1は脱型後の膨張量を基長として材令3ヵ月における各水準の膨張量を示すものである。データ1より、膨張量が最大、最小になる水準の組合せは、それぞれA₂B₁C₂、A₂B₃C₁であることがわかる。なお、水準の組合A₂B₁C₂においては0.56%の膨張量が現われている。アルカリ量3.0%以上、水セメント比0.54の場合にはより大きい膨張量が現れる。アルカリ量、水セメント比、保存温度と膨張量との関係を図-10に示す。

直交表による分散分析、最適水準および工程平均の推定は以下に行う⁴⁾。

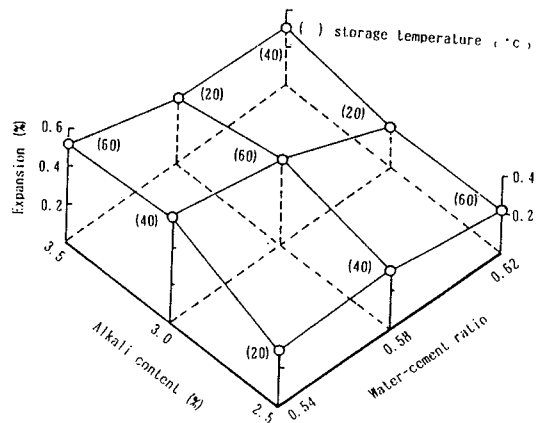


Fig. 10 Relationship between factors and expansion

1) 分散分析

表-4中のデータ1より、総平方和S_Tの分解を

$$S_T = S_A + S_B + S_C + S_e$$

とする。

平方和の計算は次のとおりである。

$$\begin{aligned} CT &= 11894.81 & S_T &= 1254.82 \\ S_A &= 300.75 & S_B &= 675.01 \\ S_C &= 257.88 & S_e &= 21.18 \end{aligned}$$

分散分析を表-5に示す。また、F表³⁾より、F(2, 2; 0.05) = 19, F(2, 2; 0.01) = 99 となる。表-5のデータ1より、V_B/V_e = 30.73 > F = 19であるからBの水準間に差があることがわかるので、Bは5%で有意である。

2) 有意となった因子Bのベシマム水準の決定

Table -4 Orthogonal table and results (L9 (3⁴))

No.	1	2	3	4	Level combination	Data 1	Data 2
1	1	1	1	1	A ₁ B ₁ C ₁	0.2989	0.0556
2	1	2	2	2	A ₁ B ₂ C ₂	0.3108	0.2180
3	1	3	3	3	A ₁ B ₃ C ₃	0.2366	0.1963
4	2	1	2	3	A ₂ B ₁ C ₂	0.5604	0.1444
5	2	2	3	1	A ₂ B ₂ C ₃	0.4620	0.2180
6	2	3	1	2	A ₂ B ₃ C ₁	0.2088	0.0672
7	3	1	3	2	A ₃ B ₁ C ₃	0.5279	0.1741
8	3	2	1	3	A ₃ B ₂ C ₁	0.3574	0.0290
9	3	3	2	1	A ₃ B ₃ C ₂	0.3091	0.0712

A * : alkali content A₁ 2.5%, A₂ 3.0%, A₃ 3.5%.
 B * : water-cement ratio B₁ 0.54, B₂ 0.58, B₃ 0.62.
 C * : storage temperature C₁ 20 °C, C₂ 40 °C, C₃ 60 °C.

Table -5 Analysis of variance

Fluctuation factor	Sum of square		Degree of freedom	Mean square		F ₀	
	(1)	(2)		(1)	(2)	(1)	(2)
A	0.0301	0.0071	2	0.0151	0.0036	13.73	3.00
B	0.0675	0.0030	2	0.0338	0.0015	30.73 *	1.25
C	0.0258	0.0327	2	0.0129	0.0164	11.72	13.6 *
Error (e)	0.0021	0.0024	2	0.0011	0.0012		
Total	0.1255	0.0452	8				

有意の因子はBであるので、ベシム水準は B_1 である。

$$\mu(B_1) = 0.4624,$$

B_1 水準の母平均の推定

B の各水準の母平均の点推定値は

$$B_1 = 0.4624, B_2 = 0.3767, B_3 = 0.2515,$$

B_1 水準の母平均の95%信頼区間の幅は

$$t(2, 0.05) \times (V_e / n)^{1/2} = 0.082$$

B の同じ因子の2つの水準間の最小有意差 I_{sd} は

$$I_{sd}(B) = t(2, 0.05) \times (2 V_e / n)^{1/2} = 0.1166$$

- 3) 最適水準の組合せ (ベシム水準の組合せ) の推定 (工程平均) B の主効果の B_1 より、95%信頼限界は

$$\mu(B_1) = 0.4624 \pm 0.082$$

結果から、促進保存条件、アルカリ量および水セメント比を組合わせた場合、膨張に及ぼす水セメント比の影響が大きいことがわかる。

(2) 促進保存について

表-4中のデータ2は各促進保存温度下の膨張特性を調べるために、オートクレープ処理直後の膨張量を基長とした各水準の膨張量を示す。データ2より、材令3ヵ月、膨張量が最大、最小になる水準の組合せはそれぞれ、 $A_2B_2C_3$ ($A_1B_2C_2$) と $A_3B_2C_1$ であることがわかる。アルカリ量、水セメント比、保存温度と膨張量との関係を図-11に示す。

1) 分散分析

平方和の計算より、

$$\begin{aligned} CT &= 1530.9, & S_a &= 29.77 \\ S_T &= 451.71, & S_c &= 326.66 \\ S_A &= 71.1, & S_e &= 24.18 \end{aligned}$$

分散分析を表-5のデータ2に示す。また、F表より、 $F(2, 2; 0.1) = 9$ 、表より、 $V_c/V_e = 13.67 > F = 9$

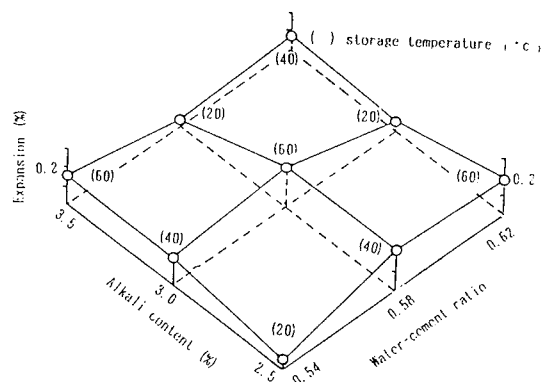


Fig. 11 Relationship between factors and expansion

であるのでCの水準間に差があることがわかる。すなわち、保存温度の影響は大きく、Cは10%で有意である。

2) 有意となった因子Cのベシム水準の決定

有意の因子はCであるので、ベシム水準は C_2 と C_3 である。

$$\mu(C_3) = 0.1961, \mu(C_2) = 0.1445,$$

C_1 水準の母平均の推定 C の各水準の母平均の点推定値は

$$C_1 = 0.0506, C_2 = 0.1445, C_3 = 0.1961,$$

C_1 水準の母平均の95%信頼区間の幅は

$$t(2, 0.05) \times (V_e / n)^{1/2} = 0.086$$

C の同じ因子の2つの水準間の最小有意差 I_{sd} は

$$I_{sd}(B) = t(2, 0.05) \times (2 V_e / n)^{1/2} = 0.1218$$

- 3) 最適水準の組合せ (ベシム水準の組合せ) の推定 (工程平均)

C の主効果より、90%信頼限界は最適水準の組合せ

$$\mu(A_2B_2C_3) = 0.1961 \pm 0.086,$$

$$\mu(A_1B_2C_2) = 0.1445 \pm 0.086,$$

結果から、オートクレーブ処理時間、促進保存温度、アルカリ量および水セメント比を組合わせた場合、膨張に及ぼす保存温度の影響が大きいことがわかる。

以上の保存温度、アルカリ量、水セメント比の組合わせの影響から、オートクレーブ処理中においては、セメントの水和による強度の発現とアルカリ骨材反応が同時に進行するが、強度の発現の方がアルカリシリカ反応の進行よりも顕著であるので、水セメント比の影響が大きく現れたと考えられる。一方、オートクレーブ処理後においては、セメントの水和反応が緩慢となり、アルカリシリカ反応の進展が保存（温度）条件によって促進されるため、水セメント比よりも保存条件の影響が大きくなったものと考えられる。

3種類の条件の場合のアルカリ量と膨張量との関係を図-12に示す。この図より、40℃保存の場合、アルカリ量の増加に伴って膨張量が增大するが、総アルカリ量 9 kg/m^3 で最大膨張量が現れ、ベシマムアルカリ量が存在することが認められる。また、暴露の場合、膨張は緩慢に進展する特性をもつため、総アルカリ量 9 kg/m^3 ま

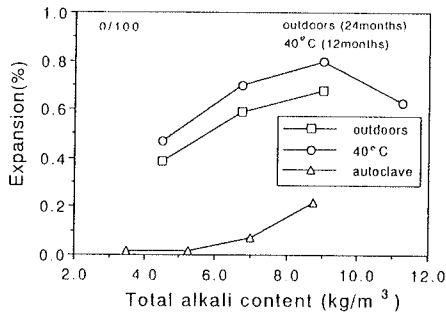


Fig. 12 Comparing with various conditions

では、アルカリ量の増加に伴って膨張量が增大するが、40℃保存の場合と同様に、 9 kg/m^3 以上で膨張量が低下すると推察できる。

オートクレーブ処理の効果を見ると、処理後の膨張量の発現はアルカリ量の大きさに伴って変化し、総アルカリ量 5.25 kg/m^3 以上で膨張量が現われ、総アルカリ量 7 kg/m^3 で処理後の膨張量が最大膨張量の約10%に達し、総アルカリ量 8.75 kg/m^3 では最大膨張量の約35%になることがわかる。オートクレーブ処理後の膨張量はアルカリ量により影響され、総アルカリ量 5.25 kg/m^3 まで膨張の発現は顕著ではない。

4. まとめ

本研究では、コンクリートを対象として促進試験のT CAM法によるコンクリートの膨張特性と要因との影響について検討するとともに、膨張に及ぼす主要因とベシマム条件を明らかにした。

以下に得られた結果を要約し、本章の結論とする。

- (1) 処理圧力 0.2 MPa のオートクレーブ処理を施した場合、アルカリ量 3.0% では処理時間4時間が、アルカリ量 2.5% 以下では処理時間6時間が最適条件であると考えられる。
- (2) 水セメント比の増加に伴ってアルカリ量のベシマム値は増大する傾向がある。細骨材に反応性骨材を使用した場合、水セメント比 0.54 と $0.58 (0.62)$ で、ベシマム総アルカリ量はそれぞれ 10.5 と 14.0 kg/m^3 になる。水セメント比 0.58 以上ではアルカリ量のベシマム値がほとんど一定になることが認められた。
- (3) 20°C 、 40°C と 60°C の保存条件下のコンクリートでは、水セメント比の大きさにかわらず、 60°C 保存における膨張量が大きい。
- (4) アルカリ量、水セメント比と保存温度の組合わせの影響についての要因の影響度の解析結果から、オートクレーブ処理中においては、セメントの水和による強度の発現とアルカリ骨材反応が同時に進行するが、強度の発現の方がアルカリシリカ反応の進行よりも顕著であるので、水セメント比の影響が大きい、すなわち、顕著である。

一方、オートクレーブ処理後においては、セメントの水和反応が緩慢となり、アルカリシリカ反応の進展が保存（温度）条件によって促進するため、水セメント比よりも保存温度の影響が大きくなった、つまり顕著になったものと考えられる。

- (5) オートクレーブ処理後の膨張量はアルカリ量によって影響され、総アルカリ量 5.25 kg/m^3 までは膨張の発現は顕著ではない。

参考文献

- 1) 中野錦一：アルカリ骨材反応の機構，セメント・コンクリート，No. 473，1986。
- 2) 川村、伽場：アルカリシリカ反応とその予防対策，土木学会論文集，No. 348，1984。
- 3) 実験の計画と解析，岩波書店，鷲尾泰俊 著
- 4) 実験計画法演習，日科技連，安藤真一，朝尾正編 P. 417，1983